

а величина дросселирования первой вакуум-камеры, кПа

$$\Delta P_{opl} = \Delta P_{\text{вк}} - \Delta P_{\text{исх}}. \quad (14)$$

Дросселирование первой вакуум-камеры и плавный нагрев исходной шихты предотвращают усадку слоя и положительно влияют на газопроницаемость шихты в основном периоде спекания.

Дросселирование целесообразно осуществлять в две ступени. В нижней части патрубка вакуум-камеры устанавливается стационарное сужающее устройство, рассчитанное на величину минимально необходимого снижения разрежения, в верхней части патрубка — мотыльковый шибер для поддержания разрежения в вакуум-камере в автоматическом режиме.

Таким образом, проведенная обработка данных экспериментальных исследований показала, что количество кислорода в продуктах сгорания, ограниченное необходимостью поддержания высокой температуры в горне, лимитирует скорость горения твердого топлива в слое под горном, и, как следствие, производительность агломашины. Количество углерода твердого топлива, перешедшего в газ из слоя под горном, в зависимости от содержания кислорода в продуктах сгорания может быть определено из уравнения (9).

Разработанная методика позволяет произвести расчет продолжительности зажигания шихты с учетом шихтовых материалов и вида газообразного топлива, сжигаемого в горне.

Список использованных источников

1. Герасимов Л. К., Дружинин Г. М., Хамматов И. М. и др. Опыт разработки и освоения зажигательных горнов агломерационных машин // Сталь. 2010. № 3. С. 23–27.
2. Фролов Ю. А. Теплотехнические аспекты процесса агломерации // Сталь. 2003. № 12. С. 2–11.

УДК 669.045

А. И. Цаплин, В. Н. Нечаев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕАКТОРЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГУБЧАТОГО ТИТАНА ПРИ ПОРЦИОННОЙ ПОДАЧЕ ИСХОДНОГО СЫРЬЯ

Аннотация

На основе математической модели, описывающей динамику неравновесного тепло-массопереноса в технологическом процессе восстановления титана из его тетрахлорида в расплаве магния, приведены результаты численного моделирования – поля температур и функции тока с учетом сопряженных процессов на границе расплава магния с блоком титана.

Ключевые слова: губчатый титан, расплав магния, тепло-массоперенос, математическая модель.

Abstract

Based on a mathematical model describing the dynamics of non-equilibrium heat recovery in the technological process of Titanium tetrachloride in the melt of magnesium, the results of numerical simulation of the temperature field, function-current, pressure, taking into account the related processes at the border of the melt of magnesium with titanium.

Keywords: sponge titanium, magnesium melt, heat and mass transfer, mathematical model.

Технология и аппаратное оформление процесса получения титана в настоящее время хорошо изучены и подробно описываются в специальной литературе [1; 2]. Производство титана сдерживается недостаточной производительностью и высокой стоимостью технологии [3]. На практике установлено, что при эксплуатации аппарата производительностью 4,8–5,0 т за цикл, на получение одной тонны губчатого титана затрачивается 5 тыс. кВт·ч электроэнергии [4]. Производительность аппаратов и печей восстановления зависит от качества исходного сырья, выбора оптимального температурного режима и соблюдения баланса по массе поданного тетрахлорида титана (ТХТ) и слитой соли.

Возникающая задача детального анализа неравновесных процессов решается на основе математической модели, впервые учитывающей сопряженные процессы на границе расплава магния с блоком пористого титана. Модель позволяет описывать динамику неравновесного тепломассопереноса в процессе порционной подачи исходного сырья.

Постановка задачи

На рис. 1 представлены реальный объект – промышленная установка восстановления и расчетная схема. Установка включает в себя печь 3, в шахту которой помещен аппарат, состоящий из реторты-реактора 2 цилиндрической формы, герметично закрытой крышкой 1. Перед началом процесса в реторту заливается расплав магния, затем на зеркало расплавленного магния 9 ведут подачу ТХТ. Верхнюю зону аппарата, расположенную на уровне 9, также называют реакционной. Жидкий тетрахлорид титана подается в аппарат порционно, при этом объем порции всегда постоянен. Скорость подачи регулируется путем изменения количества впрысков за единицу времени. По мере образования твердые частицы титана оседают в расплаве на решетку 7, где в ходе процесса формируется блок, имеющий развитую пористую структуру. Образующийся по реакции хлорид магния периодически сливается из аппарата для максимально эффективного использования внутреннего объема реторты. Теплообменник 5 предназначен для отвода избыточного тепла экзотермической реакции, он состоит из двух рядов каналов 8, верхний – для подачи, а нижний – для отвода охлаждающего воздуха. Разогрев аппарата и поддержание температуры процесса на заданном уровне осуществляется при помощи электронагревателей 4 и 6.

Представленная на рис. 1 расчетная область имеет осевую симметрию, ограничена слева осью симметрии, справа – стенкой реторты, в нижней части – решеткой эллиптического днища, сверху – уровнем расплава в реторте. Расчетная область условно разбивается по высоте на две части: первая из них ($H_{\text{Ti}} < z < H_{\text{ж}}$) содержит расплав магния, вторая ($0 < z < H_{\text{Ti}}$) – пористый титан.

Математическая формулировка задачи тепловой конвекции в расплаве магния сводится к системе уравнений переноса тепловой энергии, импульса и несжимаемости, имеющих в обозначениях работы [5] следующий вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} = \chi_{Mg} \nabla^2 T, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu_{Mg} \nabla^2 u, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu_{Mg} \nabla^2 v - g(1 - \beta T), \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad \nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (4)$$

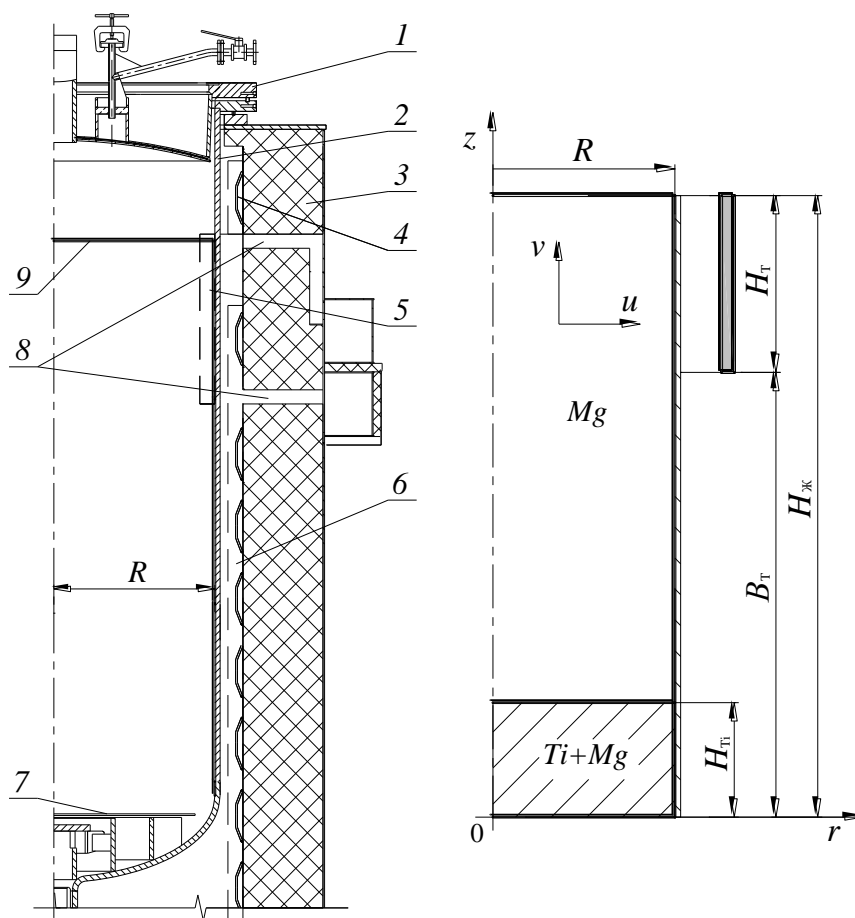


Рис. 1. Общий вид аппарата и печи восстановления (слева): 1 – крышка; 2 – реторта; 3 – шахтная электропечь; 4 – верхний нагреватель; 5 – теплообменник; 6 – нижний нагреватель; 7 – решетка эллиптического днища; 8 – каналы печи; 9 – уровень расплава. Расчетная схема (справа):

$H_{ж}$ – уровень магния; $H_{т}$ – высота теплообменника; $B_{т}$ – расстояние от 0 до теплообменника; R – внутренний радиус реторты; $H_{тi}$ – высота блока губчатого титана

Тепломассоперенос в титане, поры которого заполнены расплавом магния, описывается системой дифференциальных уравнений [6; 7]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \gamma \left(u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \chi_{\text{эф}} \nabla^2 T, \quad (5)$$

$$\frac{1}{m} \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{1}{m^2} \left(u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho_{Mg}} \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{v_{Mg}}{K} u + v_{Mg} \nabla^2 u, \quad (6)$$

$$\frac{1}{m} \frac{\partial v}{\partial \tau} + \frac{1}{m^2} \left(u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho_{Mg}} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{v_{Mg}}{K} v + v_{Mg} \nabla^2 v - g(1 - \beta T), \quad (7)$$

$$v = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad u = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad \gamma = \frac{\rho_{Mg} c_{Mg}}{\rho_{Ti} c_{Ti} + m \rho_{Mg} c_{Mg}}, \quad \chi_{\text{эф}} = \frac{\lambda_2}{\rho_{Ti} c_{Ti} + m \rho_{Mg} c_{Mg}}, \quad (8)$$

где T – температура; r, z, τ – координаты и время; u, v – компоненты вектора скорости в проекциях на оси r и z соответственно; p – давление; ρ – плотность; c – массовая теплоемкость; μ, ν – соответственно коэффициенты динамической и кинематической вязкости; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; γ – безразмерный коэффициент; χ – температуропроводность; $m = V_{\text{пор}}/V$ – пористость титана; $\lambda_2 = m\lambda_{Mg} + (1-m)\lambda_{Ti}$ – коэффициент теплопроводности титана, поры которого заполнены расплавом магния; K – проницаемость пористого титана.

Пористость губки определялась расчетным путем исходя из данных работы [8], в которой приведена линейная зависимость между удельным расходом ТХТ и пористостью губки m , соответствующая уравнению регрессии вида:

$$m = (40,66 + 0,442 M_{\text{уд}}) \cdot 10^{-2} \quad (9)$$

где $M_{\text{уд}}$ – удельный расход ТХТ, т. е. часовой массовый расход, приведенный к единице площади внутреннего сечения реактора.

В работе [9] показано, что режим конвективного движения расплава магния в аппарате турбулентный, это учитывается введением турбулентных вязкости $\nu_T = 2 \cdot 10^{-3} \nu \cdot \text{Re}$ и температуропроводности $\chi_T = \nu_T \cdot \text{Pr}^{-1/3}$ [8], где $\text{Re} = v_0(H_{\text{ж}} - H_{\text{Ti}})/\nu$ – число Рейнольдса; $\text{Pr} = \nu/\chi$ – число Прандтля. Порядок системы уравнений (1)–(8) понижается с переходом к новым переменным «завихренность-функция тока» (ω – ψ) в соответствии с соотношениями

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad \omega = \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{\partial u}{\partial z}.$$

Система уравнений (1)–(8) замыкается краевыми условиями, характеризующими технологический процесс. В начальный момент времени в расчетной области задаются параметры изотермического равновесного расплава магния

$$T(r, z, \tau = 0) = T_0, \quad \omega(r, z, \tau = 0) = \psi(r, z, \tau = 0) = 0, \quad (10)$$

где $T_0 = 780 \text{ }^\circ\text{C}$ – начальная температура расплава магния и губчатого титана.

Граничное условие теплообмена на верхней границе в ходе подачи ТХТ:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} (z = H_{\text{ж}}) = R_{\text{БГ}}, \quad R_{\text{БГ}} = [(Q_{\text{эж}} - Q_{\text{исп}})M + N_{\text{БГ}}] / (\pi R^2), \quad (11)$$

на верхней границе в отсутствии подачи ТХТ

$$R_{\text{БГ}} = N_{\text{БГ}} / (\pi R^2), \quad (12)$$

на правой границе в зоне действия теплообменника при обдуве стенки реторты воздухом

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r}(B_r \leq z \leq H_{\text{ж}}) = \alpha(T - T_c), \quad (13)$$

на правой границе в зоне нижнего нагревателя

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r}(0 \leq z < B_r) = R_{\text{HH}}, \quad R_{\text{HH}} = N_{\text{HH}} / (2\pi R H_{\text{HH}}), \quad (14)$$

$$\text{на нижней границе} \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z}(0 \leq r \leq R) = R_{\text{НГ}}, \quad R_{\text{НГ}} = N_{\text{НГ}} / (\pi R^2), \quad (15)$$

$$\text{на оси симметрии} \quad \frac{\partial T}{\partial r}(0 \leq z \leq H_{\text{ж}}) = 0, \quad (16)$$

где $R_{\text{ВГ}}$, R_{HH} , $R_{\text{НГ}}$ – плотности тепловых потоков соответственно на верхней границе, в зоне нижнего нагревателя, на нижней границе; $N_{\text{ВН}}$, N_{HH} , $N_{\text{НГ}}$ – мощности соответственно верхнего, нижнего нагревателей и нагревателя на нижней границе; $Q_{\text{экз}}$, $Q_{\text{исп}}$ – соответственно теплоты экзотермической реакции и испарения ТХТ; M – массовый секундный расход ТХТ; R – внутренний радиус реторты; T_c – температура окружающей среды; α – коэффициент теплопередачи при обдуве реторты воздухом; H_{HH} – высота нижнего нагревателя.

На проницаемой границе пористого титана с расплавом магния ($z = H_{\text{Ti}}$) должна соблюдаться непрерывность температуры, теплового потока

$$T_{\text{Mg}}(r) = T_{\text{Ti}}(r), \quad \lambda_{\text{Mg}} \frac{\partial T_{\text{Mg}}}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_{\text{Ti}}}{\partial z} \quad (17)$$

и поперечной компоненты скорости. При равенстве этих скоростей функция тока имеет вид

$$\psi(r, z = H_{\text{Ti}}) = \frac{K}{\mu} \int_0^r \frac{\partial p}{\partial z} dr. \quad (18)$$

Система уравнений (1)–(8), с учетом изменения пористости титана (9), вместе с краевыми условиями (10)–(16) и условиями сопряжения (17), (18) описывает тепломассоперенос в реакторе получения губчатого титана и решается численным методом [5].

Результаты численного исследования

Математическое моделирование проводилось для промышленного аппарата с цикловым съемом 4,8 т. Счет выполнялся на регулярной сетке с числом разбиений 30×60 соответственно в направлении координат r , z при фиксированных значениях следующих параметров. Теплофизические свойства металлов при температуре 700 °С представлены в таблице [1; 10; 11]. Характеристики теплообмена: $T_c = 20$ °С, $\alpha = 59,1$ Вт/(м²·К).

Таблица

Теплофизические свойства металлов (даны при 700 °С)

№ пп	Параметр, размерность	Численное значение	
		Mg	Ti
1	Температура плавления T , °С	650	1668
2	Плотность ρ , кг/м ³	1576	2505
3	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	97,7	19,5
4	Теплоемкость c , кДж/(кг·К)	1,344	0,655
5	Вязкость μ , Па·с	$1,1 \cdot 10^{-3}$	–
6	Коэффициент объемного расширения β , К ⁻¹	$0,38 \cdot 10^{-3}$	–

Геометрические характеристики: $R = 0,775$ м; $H_{ж} = 2,560$ м; $H_{Ti} = 0,5$ м; $B_T = 1,787$ м; $H_T = 0,772$ м. Мощности нагревателей: $N_{BH} = 47$ кВт, $N_{HH} = 282$ кВт, $N_{HT} = 94$ кВт. Теплоты экзотермической реакции и испарения тетрахлорида титана: $Q_{экз} = 642,4$ кДж/кг; $Q_{исп} = 188,180$ кДж/кг. Характеристики пористого титана: $m = 0,7$; $K = 14,6 \cdot 10^{-12}$ м². Условно принято, что блок губчатого титана перекрывает все сечение в нижней части реторты.

В работе [9] была показана двухвихревая структура движения расплава магния для условий непрерывной подачи ТХТ. В настоящей работе проводились численные исследования в условиях порционной подачи ТХТ, что ближе к реальному режиму ведения процессов восстановления. Средний массовый расход ТХТ был принят равным 420 кг/ч по аналогии с существующей технологией. В соответствии с техническими характеристиками промышленного дозатора вес одной порции сырья ориентировочно составляет 1 кг. Время загрузки одной порции ТХТ в аппарат – 1 с, соответственно при заданном массовом расходе длительность выдержки между подачей отдельных порций равна 7,6 с. Определялась продолжительность перехода расплава магния от одновихревой структуры, которая наблюдается в ходе разогрева, к двухвихревому движению металла.

В зависимости от периода процесса задавались следующие граничные условия:

- разогрев – (12), (14) на верхней и правой границах соответственно,
- подача порции ТХТ – (11) на верхней границе,
- выдержка между порциями ТХТ – (12) на верхней границе.

На стадиях подачи ТХТ и выдержки на правой границе в зонах действия теплообменника и нижнего нагревателя задавались граничные условия (13) и (14) соответственно. Независимо от стадии процесса на нижней границе и оси симметрии всегда задавались условия (15), (16).

На рис. 2 и 3 представлены расчетные изотермы и линии тока в расчетной области, заполненной магнием и пористым титаном, в различные периоды процесса восстановления.

Штриховой линией на рисунках обозначена проницаемая граница между расплавом магния и пористым титаном.

Перед проведением исследований на верхней и правой границах расчетной области задавались условия разогрева для создания замкнутого контура движения жидкого металла в расчетной области. Слева на рис. 2 и 3 показаны изотермы и линии тока на 24-й минуте разогрева. После окончания разогрева граничные условия менялись на соответствующие периоду подачи порции ТХТ. На рис. 2 и 3 в центре показано промежуточное состояние системы через 9 с после окончания разогрева. Поле температур характеризуется значительной концентрацией температурных градиентов у верхней и правой границ расчетной области, что является результатом тепловыделения от экзотермической реакции и отвода тепла. Результаты построения изолиний функции тока характеризуют нарушение однонаправленного течения расплава. У правой границы расчетной области в зоне действия теплообменника появляется новый вихрь, образовавшийся в результате охлаждения стенки реторты воздухом. Этот вихрь постепенно «раскручивается» перекрывая все сечение в верхней части расчетной области. Справа на рис. 2 и 3 показаны результаты установления двухвихревого режима движения жидкой фазы, возникающего при охлаждении верхней части реторты воздухом с одновременным подогревом ее нижней части. Определено, что период времени от окончания разогрева до выхода на установившийся режим для расплавленного магния составил 18 с.

Это время, за которое перестраивается структура циркуляции расплава магния с изменением направления движения, характеризует теплоинерционные свойства расплава в реторте.

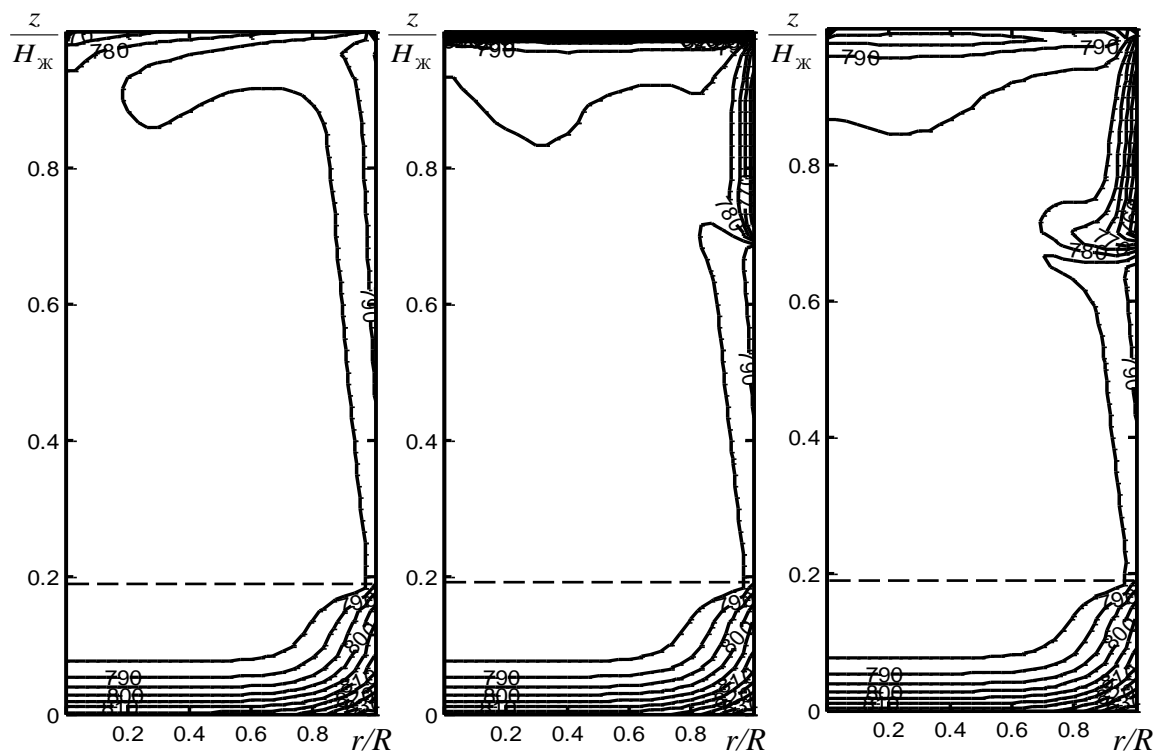


Рис. 2. Температурные поля в различные периоды процесса восстановления: разогрев магния (слева), подача порции ТХТ (в центре), выдержка

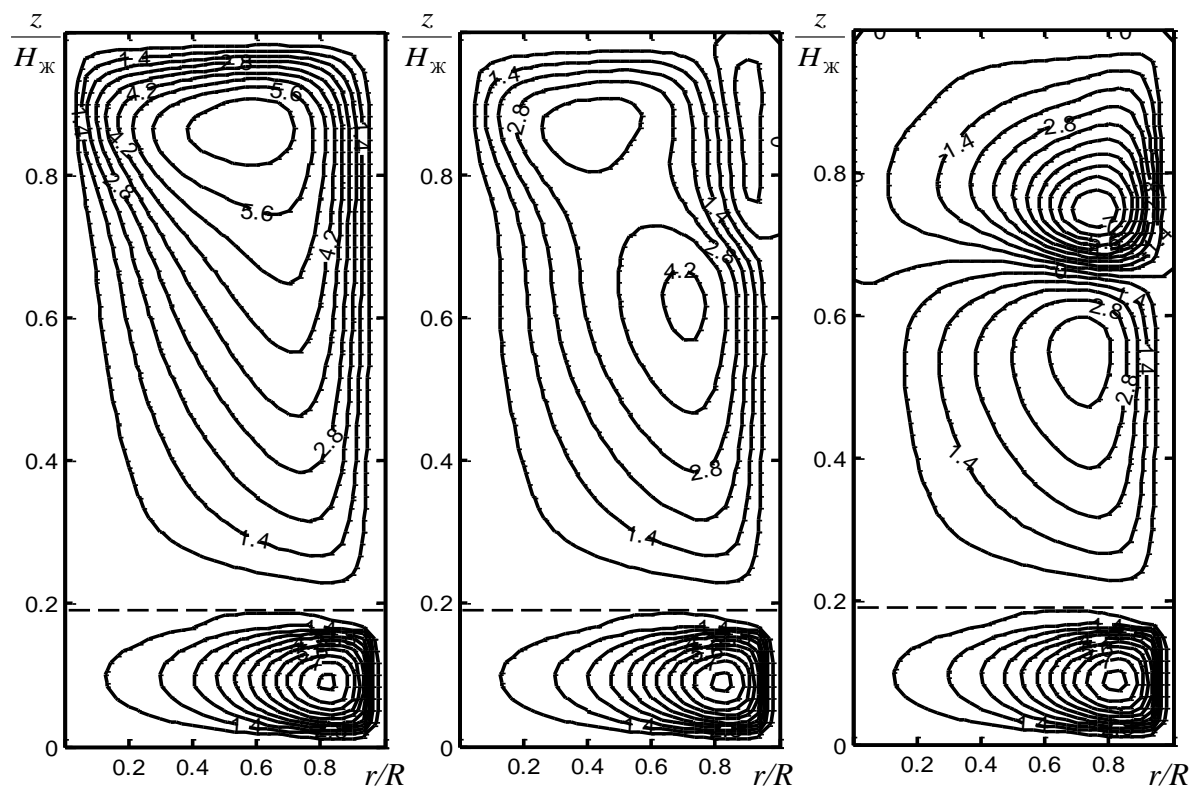


Рис. 3. Линии тока ($\text{м}^2/\text{с}$) в расплаве магния ($\psi \cdot 10^3$) и в титане ($\psi \cdot 10^8$) в различных стадиях процесса: разогрев магния (слева), подача порции ТХТ (в центре), выдержка

Заключение

При помощи разработанной математической модели выполнены параметрические расчеты по оценке динамики изменения тепловой и гидродинамической обстановки в различные периоды процесса восстановления. Разработанная математическая модель оказывается полезной для прогнозирования динамических процессов загрузки компонентов и условий теплообмена в конкретных технологических условиях промышленного производства губчатого титана.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-08-96004-р_урал_a).

Список использованных источников

1. Гармата В. А., Петрунько А. Н., Галицкий Н. В. и др. Титан. – М.: Металлургия. – 1983. – 559 с.
2. Тарасов А. В. Металлургия титана. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 328 с.
3. Листопад Д. А. Усовершенствование магнитоермического процесса получения титана губчатого с целью снижения поступления примесей // Технологический аудит и резервы производства. – Харьков. – 2012. – № 3/1(5). – С. 13–14.
4. Танкеев А. Б., Рымкевич Д. А., Путина О. А., Путин А. А., Нечаев В. Н. Интенсификация технологического режима процесса восстановления в аппарате производительностью 4,8–5 т губчатого титана за цикл // Титан. – 2007. – №1(20). – С. 3–8.
5. Цаплин А. И. Теплофизика внешних воздействий при кристаллизации стальных слитков на машинах непрерывного литья. – Екатеринбург: УрО РАН, – 1995. – 238 с.
6. Jyoti Prakash, Sanjay Kumar Gupta. Characterization of Thermohaline Convection in Porous Medium: Brinkman Model // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). – 2012. – V. 2, № 6. – pp.1082-1087.
7. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. – 211 с.
8. Власов В. В. Изучение влияния параметров процессов восстановления и сепарации на структуру губчатого титана и полноту очистки его от хлорсодержащих примесей: автореф. дис. канд. техн. наук. – Л.: ВАМИ, 1968. – 16 с.
9. Цаплин А. И., Нечаев В. Н. Численное моделирование неравновесных процессов тепломассопереноса в реакторе для получения пористого титана // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 6, № 4. – С. 483–490.
10. Эйдензон М. А. Магний. М.: Металлургия, 1969. – 352 с.
11. Руссо В. Л. Теплофизика металлургических гарниссажных аппаратов / М.: Металлургия, 1978. – 248 с.